

利用单端母线的电压暂降特征进行配电网故障定位

郑天文¹, 肖先勇^{1,2}

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:提出一种“离线仿真, 在线定位”的故障定位方法。根据线路在不同位置发生不同短路故障时会引起母线处发生不同的电压暂降的特点, 对这一特定的配电网建立仿真模型, 进行仿真, 得到配电网中各个支路的故障区段定位函数和故障测距函数, 录入仿真数据库。当配电网中发生实际短路故障时, 根据母线处采集的电压波形或者数据, 得到故障后第二周波的电压暂降幅值和相位跳变, 将其代入仿真数据库中, 利用模式识别确定故障区段, 利用解析法求得故障距离。通过对 10 kV 配电系统进行金属性和非金属性单相接地短路故障的仿真, 结果证明了该故障定位方法的准确性和可靠性。

关键词: 配电系统; 电压暂降; 单端法; 仿真数据库; 故障定位

Abstract: A fault location method is proposed, that is, simulating off-line and locating on-line. Based on that when different fault occurs at different location, the bus will experience different voltage sag, a simulation mode is established for a special distribution network to obtain the location function and fault distance function in fault section of all the branches of distribution network. Then these data are recorded into the simulation database for further use. When a real short-circuit fault occurs in distribution network, it only uses the voltage waveform or data that are acquired at the bus, the sag magnitude and phase shift value can be obtained, then they are substituted into the simulation database, the fault branch and the fault distance can be obtained through pattern recognition and analytic method respectively. Through the simulation for 10 kV distribution network with bolted and non-bolted single-phase earth short-circuit fault, it proves the accuracy and reliability of the proposed fault location method.

Key words: distribution system; voltage sag; single-end method; simulation database; fault location

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0009-05

0 引言

线路故障会造成用户供电中断。据统计, 在电力用户遭受的停电事故中, 90% 以上是由配电网故障引起的^[1]。为了快速进行故障恢复, 故障定位的目的是, 发生故障后, 快速、准确地识别故障点, 自动或手动消除故障, 恢复供电。因此, 方便、快速、准确、可靠的故障定位方法是缩短停电时间、快速恢复供电和最大限度的减少用户损失的关键^[2,3]。

现有的故障定位方法主要有: 工频分量阻抗法、高频分量行波法和基于知识的方法。阻抗法^[4-9]是经典的故障定位方法之一, 其基本原理是, 利用端点测得的工频电压、电流计算端到故障点的电气距离, 以此确定故障点。阻抗法又分单端阻抗法和双端阻抗法, 单端阻抗法的误差来源多^[8], 双端阻抗法^[9]在一定程度上能消除对端电源阻抗和过渡电阻的影

响, 阻抗法原理简单, 但易受线路阻抗、负荷和电源参数影响, 且配电线路分支较多, 难以排除伪故障点, 因此, 该方法一般不适用于配电线路故障定位。行波法^[10-16]的基本原理是通过测量故障(或人工)产生的行波, 记录行波在故障发生点和母线测量装置之间往返所需要时间(单端行波法)或者通过计算行波到达线路两端测量点的时间差(双端行波法), 根据行波波速、时间和距离的关系, 判定故障距离。在一些高压输电线路中, 行波测距技术已得到成功应用^[13,14]。也有学者利用行波测距法对配电网的故障定位进行探索^[15,16], 但是, 由于配电系统的结构复杂, 支路多, 存在很多波阻抗不连续点, 行波的反射和折射可能会发生路径改变, 或者行波波形不稳定, 很难正确地识别出故障点的反射行波, 给故障定位带来困难。基于知识的方法^[18,19]主要包括人工智能法和基于分布式设备的方法。人工智能法的理论和实践都还在不断发展并逐步成为一个独立的知识体系, 主

要包括: 人工神经网络(ANN)、模糊逻辑(fuzzy logic)、专家系统(expert system) 等。基于分布式设备的方法充分利用了多个馈线和节点处的测量信息, 建立数据库, 综合分析数据, 进行故障定位。基于知识的方法能充分利用各种故障信息, 有较高的准确性、快速性、经济性, 但算法、模型复杂, 而且, 在实际配电系统中, 尤其是中低压配电系统中, 一般仅在变电站端(母线处) 安装有测量装置, 能得到的故障信息有限, 给配电网故障定位带来了很大困难, 其主要原因在于能获得的有限信息没有得到充分利用。

实际配电系统发生故障时, 除了故障线路的电流特征发生变化外, 母线电压也会发生改变, 不同类型、不同位置的故障引起的母线电压暂降特征不同, 这里在现有故障定位方法的基础上, 引入故障时母线电压暂降特征信息^[20], 在分析配电网线路结构特征及其描述方法的基础上, 提出了一种基于母线电压值特征的配电网单端故障定位方法。用 Matlab 对 10 kV 配电网进行金属性和非金属性单相接地短路故障仿真, 证明了该方法的准确性和可靠性。

1 基于母线电压特征的故障定位原理

考虑如图 1 所示的 10 kV 配电网模型。

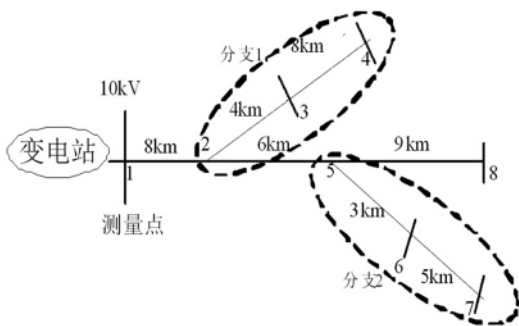


图 1 10 kV 配电网的单线图

此配电网具有一条主干线, 两条分支线。当网络中任意一点发生短路故障, 测量点 1 处都会经历不同程度的电压变化, 这种变化包括电压幅值下降和相应相位改变等, 如果电压值维持在额定电压的 10% ~ 90% 之间, 根据 IEEE 的定义, 这类事件被定义为电压暂降。对于给定系统, 测得的电压暂降严重程度主要取决于故障发生的位置, 即故障点距母线 1 的距离。靠近母线 1 的位置发生故障, 测得的暂降较为严重, 反之, 电压暂降特征的明显度会减小。对于不同的故障类型、故障位置, 在母线 1 得到的电压暂降

特征也不相同。分析发现, 有三种不同类型的变量引起电压暂降幅值和相位的变化: 非线性变量、线性变量、不变量。而且, 不同区段对应各自不同的变量值。基于这些特点, 可以确定电压暂降幅值、相位跳变、故障距离三者之间的函数关系。通过仿真得到电压暂降数据库, 用于存储故障区段定位函数和故障测距函数的相关系数。图 2 为故障定位方法的大体构架。

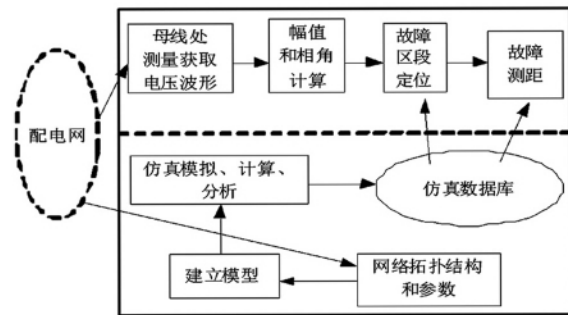


图 2 故障定位方法大体结构

2 仿真数据库的建立

仿真数据库相当于一面镜子, 能够映射出实际配电网系统中的故障情况。仿真数据库主要包括以下两个子数据库: 母线处电压暂降数据库、故障区段和故障测距数据库。

2.1 母线处电压暂降数据库

通过对实际配电网系统进行三相不平衡潮流和故障分析, 建立母线处电压暂降数据库。其大致步骤如下。

- (1) 用三相不平衡潮流分析某个节点故障前和故障期间的电压值;
- (2) 通过故障分析, 计算出某个仿真节点故障时, 在母线处得到的电压暂降幅值和相位跳变。
- (3) 重复步骤(1)、(2), 直至计算完所有仿真节点故障时引起的母线电压暂降。

得到的电压暂降数据库如图 3

1	V_1	θ_1
2	V_2	θ_2
3	V_3	θ_3
4	V_4	θ_4
5	V_5	θ_5
⋮	⋮	⋮
x	V_x	θ_x

图 3 母线处电压暂降数据库

第一列是仿真节点编号, 第二、三列分别是在对应的仿真节点下发生故障时, 母线处得到的电压暂降幅值和相位跳变。

2.2 故障区段和测距数据库

由前面的理论分析可知,在不同的区段,电压暂降幅值和相位跳变,电压暂降幅值和故障距离之间的函数关系不同。函数关系如下。

$$\theta_x = b_1^{ij} V_x + b_0^{ij} \quad (1)$$

$$v_x = a_2^{ij} d^2 + a_1^{ij} d + a_0^{ij} \quad (2)$$

V_x, θ_x 为在仿真点 x 处发生故障时,母线处得到的电压暂降幅值和相位跳变; ij 为区段两端点 i, j ; b_0^{ij}, b_1^{ij} 为故障区段函数的系数; $a_0^{ij}, a_1^{ij}, a_2^{ij}$ 为故障测距函数的系数。

1	2	b_0^{12}	b_1^{12}
2	3	b_0^{23}	b_1^{23}
3	4	b_0^{34}	b_1^{34}
⋮	⋮	⋮	⋮
i	j	b_0^{ij}	b_1^{ij}

图4 故障区段数据库

1	2	a_0^{12}	a_1^{12}	a_2^{12}
2	3	a_0^{23}	a_1^{23}	a_2^{23}
3	4	a_0^{34}	a_1^{34}	a_2^{34}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
i	j	a_0^{ij}	a_1^{ij}	a_2^{ij}

图5 故障测距数据库

3 故障定位算法

所提故障定位算法分为两步:①确定可能的故障区段;②计算可能故障区段内的故障距离。

3.1 故障区段定位算法

不同区段电压暂降幅值和相位跳变存在不同的一次线性关系。图6反映了三个区段的这种线性关系。

从图6可知,分别计算测量点得到的电压暂降和相位跳变(V_{meas}, θ_{meas})到各区段函数表示的曲线的最短距离。根据点到直线的距离公式为

$$D_{ij} = \frac{AV_{meas} + B\theta_{meas} + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (3)$$

ij 为区段两端点 i, j ; $A = b_1^{ij}, B = -1, C = b_0^{ij}$; 得到一系列距离值,按从小到大的顺序升序排列,就可以得到可能的故障区段排序。如图6所示, $D_{67} < D_{34} <$

D_{58} , 则按可能性大小降序排列的故障区段分别为区段6-7、区段3-4、区段5-8。

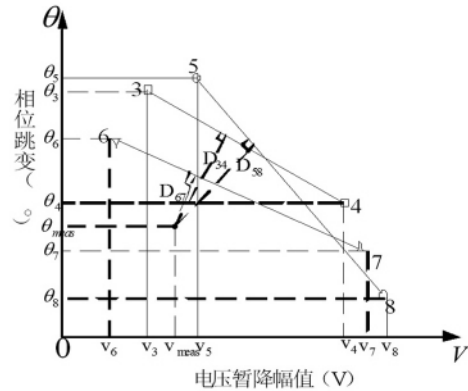


图6 不同区段的电压暂降幅值和相位跳变关系

3.2 故障测距算法

故障测距函数表示的是电压暂降幅值和故障距离的二次函数关系,确定出可能的故障区段后,可以根据下式计算出故障距离为

$$d = \frac{a_1^{ij} \pm \sqrt{(a_1^{ij})^2 - 4a_2^{ij}(a_0^{ij} - V_{meas})}}{(2 - 2a_2^{ij})} \quad (4)$$

此方程有两个实数解,根据各个区段的距离范围,剔除不在所求区段的伪根,就有且只有一个满足要求的故障距离 d 。

4 仿真结果

利用 Matlab 仿真软件,通过构建一个图1所示的仿真模型和相应的编程算法,对文中的故障定位方法作了初步验证。分别进行金属性(接地电阻 $R = 0 \Omega$)和非金属性(接地电阻 $R = 50 \Omega$)单相接地短路故障仿真,结果如表1、表2。

通过仿真结果的数据可以看出,该方法能够比较准确的确定故障区段和故障距离:最多两次就能定位出故障区段;故障距离的最大绝对误差不超过250米,最大相对误差不超过2%。对于非金属性故障,由于接地电阻增加,引起母线处的电压暂降程度减小,相对金属性故障误差较大,但是在允许的范围之内。

5 结论

所提故障定位方法精度较高,需要的测量装置少,使用的数据容易获得。能比较准确地确定故障所在支路和故障距离,消除了伪故障点,提高了故障定位的准确性和可靠性。此方法适用于任何辐射状的

表1 金属性单相接地短路故障

实际故障发生区段	实际故障距离/km	可能的故障区段	各区段对应的故障距离/km	故障区段准确率/%	故障距离绝对误差/m	故障距离相对误差/%
1-2	6	1-2	6.034	100	34	0.57
2-3	11	2-3	10.8548	100	-145.2	-1.32
		2-5	10.905		95	0.87
3-4	17	3-4	16.982	100	-18	-0.11
		6-7	17.190		190	1.11
		5-8	17.200		200	1.18
2-5	12.8	2-5	12.7802	100	-19.8	-0.15
		3-4	12.7186		-81.4	-0.64
5-6	15.5	5-8	15.518	66.7	18	0.12
		5-6	15.489		-11	-0.07
		3-4	15.404		-96	-0.62
6-7	19.5	5-8	19.480	66.7	-20	-0.10
		6-7	19.490		-10	-0.05
		3-4	19.410		-90	-0.46
5-8	19	5-8	18.980	100	-20	-0.11
		6-7	19.050		50	0.26
		3-4	18.917		-83	-0.44

表2 非金属性单相接地短路故障

实际故障发生区段	实际故障距离/km	可能的故障区段	各区段对应的故障距离/km	故障区段准确率/%	故障距离绝对误差/m	故障距离相对误差/%
1-2	6	1-2	6.054	100	54	0.90
2-3	11	2-3	10.813	100	-187	-1.70
		2-5	10.905		95	0.87
3-4	17	3-4	16.973	100	-27	-0.16
		6-7	17.201		201	1.18
		5-8	17.220		220	1.29
2-5	12.8	2-5	12.790	100	10	0.08
		3-4	12.712		88	0.69
5-6	15.5	5-6	15.520	66.7	20	0.13
		5-8	15.472		-28	-0.18
		3-4	15.422		-78	-0.50
6-7	19.5	6-7	19.531	100	31	0.16
		5-8	19.486		-14	-0.07
		3-4	19.425		-75	-0.38
5-8	19	6-7	19.028	66.7	28	0.15
		5-8	19.047		47	0.25
		3-4	18.905		-95	-0.50

配电网络,只要网络的拓扑结构(线路参数,连接方式,供电区域等)已知,就可以对这个特定的网络采用文中方法进行分析,准确有效地实现这个网络的故障定位。本方法是一种“离线仿真,在线定位”的故障定位方法,仿真过程中的故障模型以及负荷模型的建立有待改进和完善。

参考文献

[1] 李天友,金文龙,徐丙垠. 配电技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2008.

[2] 郭俊宏,谭伟璞,杨以涵,等. 电力系统故障定位原理综述[J]. 继电器, 2006, 34(3): 76-81.

[3] 马士聪,高厚磊,徐丙垠,等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119-124.

[4] 索南加乐,齐军,陈福锋,等. 基于R-L模型参数辨识的输电线路准确故障测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 119-125.

[5] Karl Zimmerman and David Costello, Impedance - Based Fault Location Experience [C]. Protective Relay Engi-

neers 58th Annual Conference , Apr. 2005: 211 – 216.

[6] J. Mora – Flores , J. Melendez. Comparison of Impedance Based Fault Location Methods for Power Distribution Systems [J]. Electric Power Systems Research ,2008: 657 – 666.

[7] A. L. Dalcastagne and S. L. Zimath ,A Study about the Sources of Error of Impedance – Based Fault Location Methods [C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America 2008 IEEE/PES: 1 – 6.

[8] 陈铮 ,董新洲 ,罗承沐. 单端工频电气量测距算法的鲁棒性[J]. 清华大学学报(自然科学版) ,2003 ,43(3) : 310 – 313.

[9] Girgis A. A et al. A New Fault Location Technique for Two and Three – terminal Lines [J]. IEEE Trans. on Power Delivery ,1992 ,7(1) : 98 – 107.

[10] Magnago F. H. ,Abur ,A. . Fault Location Using Wavelets [J]. IEEE Transaction on Power Delivery ,1998 ,13(4) : 1475 – 1480.

[11] 徐丙垠 ,李京 ,陈平 ,等. 现代行波测距技术及其应用 [J]. 电力系统自动化 ,2001 ,25(23) : 62 – 65.

[12] 李友军 ,王俊生 ,郑玉平 ,等. 几种行波测距算法的比较 [J]. 电力系统自动化 ,2001 ,25(15) : 36 – 40.

[13] 董新洲 ,葛耀中 ,徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距的研究 [J]. 中国电机工程学报 ,1999 ,19(4) : 76 – 80.

[14] 曾祥君 ,尹项根 ,林福昌 ,等. 基于行波传感器的输电线路故障定位方法的研究 [J]. 中国电机工程学报 ,2002 ,22(6) : 42 – 46.

[15] Hizman ,H. ,Crossley ,P. A. ,et al. Fault Section Identification and Location on a Distribution Feeder Using Traveling Waves [C]. Power Engineering Society Summer Meeting 2002 IEEE ,25 July 2002 (3) : 1107 – 1112.

[16] 于盛楠 ,杨以涵 ,鲍海. 基于 C 型行波法的配电网故障定位的实用研究 [J]. 继电器 ,2007 ,35(10) : 1 – 4 ,12.

[17] Tawfik ,M. M. Morcos ,M. M. ANN – based Techniques for Estimating Fault Location on Transmission Lines Using Prony Method [J]. IEEE Transaction on Power Delivery ,2001 ,16(2) : 219 – 224.

[18] YU Yue – hai ,BAI Yichuan ,XI Guo – fu ,et al. Fault Analysis Expert System for Power System [C]. 2004 International Conference on Power System Technology ,21 – 24 Nov 2004(2) : 1822 – 1826.

[19] 杜刚 ,刘迅 ,苏高峰. 基于 FTU 和“S”信号注入法的配电网接地故障定位技术的研究 [J]. 电力系统保护与控制 ,2010 ,38(12) : 73 – 76.

[20] Bollen M. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions IM2. IEEE Press ,New York ,2000. (收稿日期:2011 – 04 – 10)

(上接第4页)

[3] 张钦 ,王锡凡 ,付敏. 需求响应视角下的智能电网 [J]. 电力系统自动化 ,2009 ,33(17) : 49 – 55.

[4] Bosheli F ,Veloza O P. Review of Developed Demand Side Management Programs Including Different Concepts and Their Results [C]. Proceedings of IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America ,Bogota ,Colombia 2008: 1 – 7.

[5] Rahimi F. Overviews of Demand Response Programs at Different ISOs/RTOs [C]. Proceedings of IEEE Power Systems Conference and Exhibition ,USA ,Seattle ,WA 2009: 1 – 2.

[6] Abreu K. PG&E’s Perspective on Demand Response under the Smart Grid Paradigm [C]. Proceedings of IEEE Power Systems Conference and Exhibition (PSCE’09) ,Seattle ,WA ,USA ,2009.

[7] Rahimi F ,Ipakchi A. Overview of Demand Response under the Smart Grid and Market paradigms [J]. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) 2010: 1 – 7.

[8] Noreen Parks. Energy Efficiency and the Smart Grid [J]. Environmental Science & Technology ,2009 ,43(9) : 2999 – 3000.

[9] Steve Collier. Ten Steps to a Smarter Grid [C]. 2009 IEEE Rural Electric Power Conference(REPC 09) ,Fort Collins ,Colorado ,USA 2009 : B2 – B2 – 7.

[10] Albadi ,M. H ,El – Saadany ,E. F. Demand Response in Electricity Markets: An Overview [C]. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting 2007: 1 – 5.

[11] Menniti D ,Costanzo F ,Scordino N ,Sorrentino ,N. Purchase – Bidding Strategies of an Energy Coalition With Demand – Response Capabilities [C]. Power Systems ,IEEE Transactions 2009 ,24(3) : 1241 – 1255.

[12] Dam Q B ,Mohagheghi S. Stoupis ,J. Intelligent Demand Response Scheme for Customer Side Load Management [C]. Energy 2030 Conference ,2008: 1 – 7.

[13] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化 ,2009 ,33(9) : 1 – 4.

[14] Mak S. T. A Synergistic Approach to Implement Demand Response ,Asset Management and Service Reliability Using Smart Metering ,AMI and MDM Systems [C]. IEEE Power & Energy Society General Meeting 2009: 1 – 4. (收稿日期:2011 – 04 – 10)